

論文94-31B-1-5

## 우주선에 설치된 로봇의 협동 제어에 관한 연구

## (Cooperative Control of a Spaceshuttle / Manipulator System)

李章明\*

(Jang Myoung Lee)

## 要約

우주선에 설치된 로봇의 제어는 로봇의 기반(Base), 즉 우주선이 고정되어 있지않고 유동하는 관계로 기존의 Jacobian을 사용한 Resolved Motion Control이 불가능하다. 로봇이 조립 혹은 수선을 위해 작동할때 그 반작용으로 인하여 우주선의 위치와 고도가 바뀌게 되며, 이 반작용의 영향으로 인하여 로봇의 정확한 제어에 오차를 초래하게 된다. 그러므로, 이러한 반작용의 영향을 고려한 새로운 형태의 Jacobian(Extended Jacobian)을 정의하고 이 새로운 Jacobian을 사용하여 로봇의 동작(조립 혹은 수선)이 우주선에 미치는 영향을 최소화 하도록 한다. 본 연구에서는 잉여관절(Redundancy)을 활용하여 로봇의 동작이 우주선에 미치는 영향을 제거함으로써 하여, 로봇이 정확한 조립 및 수선동작을 행하는 동시에 우주선은 지정된 위치와 고도를 유지할 수 있도록 한다.

## Abstract

The conventional resolved motion control is not applicable for the control of robots on the spacecraft on account of the floating base of the robots. When the robots perform the assembly or repair operations, the position and attitude of the base satellite are disturbed by the reaction force/moment caused by the robot motion. This reaction will cause error on the robot motion. Therefore, we define a new type of Jacobian(Extended Jacobian) to minimize the effects of reaction on the accuracy of the robot performing assembly or repair operations. In this paper, we utilize the redundancy of the closed chain system to minimize the effects of the robot motion on the position and attitude of spacecraft. This will results in the accurate assembly and repair operations by the robot.

## 1. 서론

우주선에 설치된 두개의 로봇이 하나의 동일 물

체를 단단히 쥐고 동작을 행할때 폐쇄키네마틱사슬(Closed Kinematic Chain)이 형성되게 된다. 그러한 계에 있어서 동작물체의 제어뿐만 아니라 우주선의 제어도 필연적으로 행해져야만 한다. 이러한 우주선상에 설치된 두개의 로봇의 협동적 제어는 최근 우주선의 제거 및 수리를 위해 그 필요성이 증대되어 지고 있다.<sup>[1,2,3,5]</sup> 우주선에 설치된 로봇의 제어의

\*正會員, 釜山大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec.Eng., Pusan Nat'l Univ)  
接受日字 : 1993年 3月 24日

어려운 점은 로봇트 동작에 의한 반작용 힘과 모멘트 (Force and Moment)로 우주선의 고도와 위치가 변함에 있다.<sup>19,10)</sup> 기반 우주선 자체를 독립적으로 최근까지 반사제트(Reaction Jets)를 사용하여 제어해 왔다. 그러나 반사 제트는 연료소모가 크며, 그로 인하여 우주선의 수명을 단축시키고, 또한 정밀한 제어도 어려운 실정이다. 그러므로, 효율적인 작업 수행을 위하여 로봇트 제어와 우주선의 제어를 함께 행해주는 것이 바람직하다. 최근 Vafa와 Dubowsky<sup>6)</sup>는 우주선에 설치된 로봇트의 일공간(Workspace)을 분석하기에 적합한 “유사메니퓰레이트”(Virtual Manipulator)방식을 고안하였다. 또한 그들은 우주선에 설치된 로봇트의 제어계는 다이나믹 특성들의 함수로 되는 다이나믹 특이점(Dynamic Singularity)이 존재함을 보였다. 이 다이나믹 특이점들은 종래의 고정된 기반 로봇트(Fixed-base Robot)에서 존재하는 키네마틱 특이점과는 달리 로봇트의 키네마틱 특성으로 부터 분석되어지지 않기 때문에 그 존재의 가능성을 예견하고 피하기가 매우 어렵다. 폐쇄키네마틱 사슬에 존재하는 잉여도를 활용하면 로봇트의 동작이 우주선에 미치는 영향을 극소화하고 다이나믹 특이점들을 피할 수가 있을 것이다. 본 논문에서는 우주선에 설치된 두개의 로봇트가 가지고 있는 잉여도를 활용하여 이러한 반작용의 효과를 극소화하고 동작의 효율성과 정확도를 높이고자 한다.

II. 폐쇄키네마틱 사슬의 분석

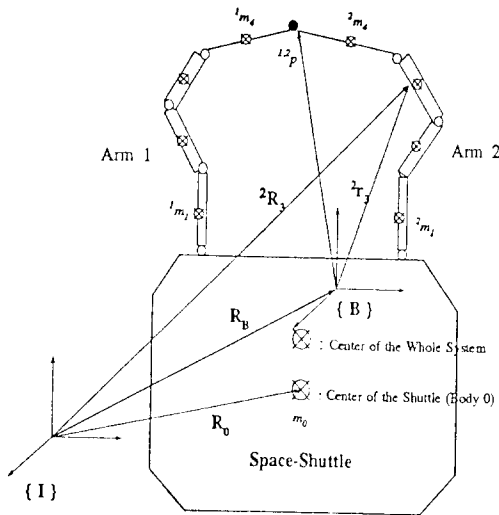


그림 1. 폐쇄키네마틱 사슬계  
Fig. 1. Closed Kinematic Chain System.

폐쇄키네마틱 사슬은 두개의 작업점(Task Points), 즉 함께 쥘 물체의 중앙과 기반 우주선상의 한점에 의하여 좌측 로봇트와 우측 로봇트로 분리되어질 수 있다. 이 분리에서 그 함께 쥘 물체는 각 로봇트의 마지막 링크의 연장으로 생각할 수가 있다.<sup>8,11,12)</sup>

우선 우주선의 움직임을 궤도(Orbit)를 기준으로 나타내기 위하여 두개의 좌표축들을 정의한다. 이너셜 축(Inertial Frame), <I>, 는 궤도상에, 그리고 기반축(Base Frame), <B>, 는 그 계의 공통 기반위에 설정한다. 그림 1에서 보듯이 <sup>k</sup>R<sub>i</sub>와 <sup>k</sup>r<sub>i</sub>는 각각 좌표축 <I>와 <B>에서 k번째 로봇트의 i번째 몸체(i-th Body)까지의 위치 벡터(Positioning Vector)이다. 벡터 <sup>k</sup>R<sub>i</sub>는 벡터 <sup>k</sup>r<sub>i</sub>와 좌표축 <I>에서 <B>까지의 위치 벡터인 R<sub>B</sub>의 합으로 다음과 같이 표시된다.

$${}^kR_i = R_B + {}^k r_i \tag{1}$$

또한 각 로봇트의 i번째 링크(i-th Link)의 움직임은 기반축을 기준으로 다음과 같이 표시된다.

$${}^kV_i = {}^k J_{Li} + {}^k q \tag{2a}$$

$${}^kW_i = {}^k J_{Ai} + {}^k q \tag{2b}$$

위에서 k(=1,2)는 로봇트의 갯수를 나타낸다. 각 링크의 실제 움직임, [<sup>k</sup>V<sub>i</sub><sup>T</sup> <sup>k</sup>Ω<sub>i</sub><sup>T</sup>]<sup>T</sup>, 는 그들 각각의 조인트 움직임(Joint Motion)과 기반 움직임(Base Motion)의 합으로 된다. 따라서, 각 링크의 실제 움직임은 이너셜축에 대해 다음과 같이 표시된다.

$${}^kV_i = {}^k v_i + V_B - {}^k r_i \times \Omega_B \tag{3a}$$

$${}^k\Omega_i = {}^k \omega_i + \Omega_B \tag{3b}$$

위에서 [<sup>k</sup>V<sub>B</sub><sup>T</sup> <sup>k</sup>Ω<sub>B</sub><sup>T</sup>]<sup>T</sup>는 공통기반의 이너셜 축에 대한 움직임을 나타낸다. 각 로봇트가 가지는 모멘텀(Momentum), 즉 각 링크의 모멘텀의 합은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$${}^kP = \sum_{i=1}^n {}^k m_i {}^k V_i \tag{4a}$$

$${}^kL = \sum_{i=1}^n ({}^k I_i {}^k \Omega_i + {}^k m_i {}^k R_i \times {}^k V_i) \tag{4b}$$

위에서 <sup>k</sup>I<sub>i</sub>는 로봇트 [i]의 k번째 링크의 이너시아 행렬(Inertia matrix)을 나타낸다. 따라서 폐쇄키네마틱 사슬계의 전체 모멘텀은 다음과 같이 표시된다.

$$P = {}^1P + {}^2P + m_0 V_B \tag{5a}$$

$$L = {}^1L + {}^2L + I_0\Omega_B + m_0R_0 \times V_B \quad (5b)$$

위에서  $m_0$ 는 우주선의 질량 그리고  $I_0$ 는 우주선의 이너시아 행렬을 나타낸다. 우주공간에서의 중력은 무시 되어질 수 있으므로, 초기계가 정지 상태였다고 가정하면, 전체계의 모멘텀은 영으로 간주되어질 수 있다. (즉,  $P=0$  및  $L=0$ ). 모멘텀 보존의 법칙(Momentum Conservation Law)<sup>[8,9]</sup>을 사용하면, 기반우주선의 움직임과 로봇의 움직임은 조인트 움직임의 함수로 표시 되어질 수 있다.

우선 기반 우주선의 움직임, 즉,  $x_B = \begin{bmatrix} V_B \\ \Omega_B \end{bmatrix}$ 를 조인트 움직임  $q = \begin{bmatrix} {}^1q \\ {}^2q \end{bmatrix}$ 의 함수로 나타내 보자.

식(2), (3) 및 (4)를 식(5)에 대입하면 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$${}^1MJ\dot{q} + {}^2MJ\dot{q} + ({}^1M + {}^2M + m_0I)V_B - ({}^1M\bar{r} + {}^2M\bar{r})\Omega_B = 0 \quad (6a)$$

$$({}^1M\bar{R}J + {}^1IJ)\dot{q} + ({}^2M\bar{R}J + {}^2IJ)2\dot{q} + ({}^1M\bar{R} + {}^2M\bar{R} + m_0R_0) \times V_B + ({}^1I + {}^2I - {}^1M\bar{R} + {}^2M\bar{R} + I_0)\Omega_B = 0 \quad (6b)$$

$$\text{위에서 } {}^1MJ = \sum_{i=1}^n m_i {}^1J_{Li}, \quad {}^1M = \sum_{i=1}^n m_i U, \quad {}^1M\bar{r} = \sum_{i=1}^n m_i {}^1r_i \times,$$

$${}^1M\bar{R}J = \sum_{i=1}^n m_i {}^1R_i \times {}^1J_{Li}, \quad {}^1IJ = \sum_{i=1}^n I_i {}^1J_{Ai}, \quad {}^1M\bar{R} = \sum_{i=1}^n m_i {}^1R_i \times,$$

$${}^1M\bar{R}\bar{r} = \sum_{i=1}^n m_i {}^1R_i \times {}^1r_i, \quad {}^1I = \sum_{i=1}^n I_i.$$

그리고  $U$ 는  $3 \times 3$  동일행렬(Unity Matrix)이다.

행렬식에 크로스 곱(Cross Product)이 있으면, 이 는 대응되는 행렬 형태로 바뀔 수 있음을 사용한다. 일례로,

$$\bar{P} \left( \overset{\Delta}{=} P \times \right) = \begin{bmatrix} 0 & -p_z & p_y \\ p_z & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{bmatrix} \quad \text{여기서 } P = [p_x, p_y, p_z]^T.$$

조인트 움직임  ${}^1\dot{q}$  와  ${}^2\dot{q}$  에 의한 우주선에의 반작용의 영향,  $V_B$ 와  $\Omega_B$ 는 다음과 같이 표시 된다.

$$\begin{bmatrix} V_B \\ \Omega_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1MJ & {}^2MJ \\ {}^1M\bar{R}J + {}^1IJ & {}^2M\bar{R}J + {}^2IJ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1\dot{q} \\ {}^2\dot{q} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\overset{\Delta}{=} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1\dot{q} \\ {}^2\dot{q} \end{bmatrix}$$

위에서

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1M + {}^2M + m_0I & -({}^1M\bar{r} + {}^2M\bar{r}) \\ {}^1M\bar{R} + {}^2M\bar{R} + m_0R_0 \times & {}^1I + {}^2I - {}^1M\bar{R} + {}^2M\bar{R} + I_0 \end{bmatrix}^{-1}$$

(7)은 다음과 같이 다시 표시할 수 있다.

$$\dot{X}_B = \dot{W}q \quad (8)$$

위에서

$$W = [\omega_1, \omega_2] \in R^{m \times 2n}, \quad \omega_1 = \begin{bmatrix} Q_{11} \\ Q_{21} \end{bmatrix}, \quad \omega_2 = \begin{bmatrix} Q_{12} \\ Q_{22} \end{bmatrix} \quad \text{그리고 } \dot{q} = \begin{bmatrix} {}^1\dot{q} \\ {}^2\dot{q} \end{bmatrix}.$$

이제, 각 로봇의 움직임 ( ${}^1X$ 와  ${}^2X$ )을 조인트 움직임의 합으로 나타내 보자. 로봇 손(Hand)의 속도는 기반 우주선의 움직임과 로봇의 각 조인트의 움직임으로 표시되어진다.<sup>[7,13,14]</sup>

$${}^1X = \begin{bmatrix} {}^1J_L \\ {}^1J_A \end{bmatrix} {}^1\dot{q} + \begin{bmatrix} V_B - {}^1p \times \Omega_B \\ \Omega_B \end{bmatrix} \quad (9a)$$

$${}^2X = \begin{bmatrix} {}^2J_L \\ {}^2J_A \end{bmatrix} {}^2\dot{q} + \begin{bmatrix} V_B - {}^2p \times \Omega_B \\ \Omega_B \end{bmatrix} \quad (9b)$$

위에서  ${}^k p$ 는 기반 우주선 축의 원점으로 부터 로봇 손까지의 위치벡터이고  ${}^1J = \begin{bmatrix} {}^1J_L \\ {}^1J_A \end{bmatrix}$  와  ${}^2J = \begin{bmatrix} {}^2J_L \\ {}^2J_A \end{bmatrix}$ 은 각 로봇 1과 로봇 2의 Jacobian 행렬이다.

(7)에 의하여 기반 우주선의 움직임이 조인트 움직임의 함수로 표시 되어졌으므로, 각 로봇 손의 움직임은 이제 조인트 움직임만의 함수로 표시 되어진다.

$${}^1X = \alpha_1 {}^1\dot{q} + \beta_1 {}^1\dot{q} \quad (10a)$$

$${}^2X = \alpha_2 {}^1\dot{q} + \beta_2 {}^1\dot{q} \quad (10b)$$

$$\text{위에서 } \alpha_k = \begin{bmatrix} (2-k) {}^k J_L + Q_{11} - {}^k p \times Q_{21} \\ (2-k) {}^k J_A + Q_{21} \end{bmatrix} \quad \text{이고} \\ \beta_k = \begin{bmatrix} (k-1) {}^k J_L + Q_{12} - {}^k p \times Q_{22} \\ (k-1) {}^k J_A + Q_{22} \end{bmatrix} \quad \text{이다.}$$

각 로봇의 움직임은 그 로봇 조인트 움직임만으로 제어되어질 수 없다는 점을 주목해야 한다. 각 로봇의 특이점들, 즉,  ${}^1X=0$  혹은  ${}^2X=0$ 은 조인트 자세(Joint Configuration)의 함수일 뿐만아니라 로봇/우주선의 이너시아 분포의 함수이기도 하다. 이제 식(10)은 다음과 같이 다시 쓰여질 수 있다.

$$\dot{X}_{ex} = J_{ex} \dot{q} \quad (11)$$

위에서 확장된 Jacobian(Extended Jacobian),  $J_{ex}$ 는 다음과 같이 정의 되어진다.

$$J_{ex} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 \end{bmatrix} \in R^{2m \times 2n} \quad \text{및 } \dot{X}_{ex} = \begin{bmatrix} {}^1X \\ {}^2X \end{bmatrix} \quad \text{그리고 } \dot{q} = \begin{bmatrix} {}^1\dot{q} \\ {}^2\dot{q} \end{bmatrix}.$$

식(8)은 두개의 로봇에 의한 물체운반 동작을 나타내고, 식(11)은 기반 우주선의 움직임을 나타낸다. 폐쇄키네마틱 사슬에 존재하는 잉여도는 이 두개의 일을 가능하면 동시에 달성하는 목적으로 활용되어질 수 있다. 또한, 주어진 일을 행함에 있어서 두 로봇 움직임들 간의 기하학적 제약을 활용하면 최적화

문제의 차원을 줄일 수 있다.<sup>[12]</sup>

### Ⅲ. 폐쇄 사슬계의 협동적 제어

로봇트 손에 할당된 일을 효율적으로 수행하기 위하여, 그 로봇트 뿐 만 아니라 우주선의 제어도 필요하다. 만약에 폐쇄사슬계에 충분한 잉여도가 존재하면, 두개의 작업점들(로봇트 손 및 우주선)은 동시에 지정된대로 제어되어질 수 있다. 일반적으로 조인트 움직임에 의한 기반 우주선에 미치는 영향을 최소화 하는 것이 바람직하다. 이는 비록 반사 제트가 우주선에 설치되어 있을지라도, 이 반사 제트를 가능하면 적게 활용하여 우주선의 수명(Lifetime)을 연장시키고 고주파/고정밀 움직임을 제어할 수 있도록 한다. 여기서 우주선/로봇트계에 존재하는 잉여도를 활용하여 우주선에의 반작용 움직임을 최소화 하고자 한다. 이 문제는 다음과 같이 정리되어진다.

1. 다음을 만족하는 조인트 움직임  $\dot{q}$ 을 구하면서

$$\begin{bmatrix} {}^1X \\ {}^2X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1\dot{q} \\ {}^2\dot{q} \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.  $\|X_B\|$ 를 최소화 한다.

$$\begin{aligned} Cost &= \|\dot{X}_B\|^2 \\ &= \dot{q}^T W^T W \dot{q} \end{aligned} \quad (13)$$

식(12)의 우항은 주 부분(첨자 M으로 표시되어진다.)과 보조부분(첨자 S로 표시 되어진다.)으로 나뉘어져 표시되어질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} {}^1X \\ {}^2X \end{bmatrix} = \Gamma_M \begin{bmatrix} {}^1\dot{q}_M \\ {}^2\dot{q}_M \end{bmatrix} + \Gamma_S \begin{bmatrix} {}^1\dot{q}_s \\ {}^2\dot{q}_s \end{bmatrix} \quad (14)$$

위에서  $\Gamma_M \begin{bmatrix} \alpha_{1M} & \beta_{1M} \\ \alpha_{2M} & \beta_{2M} \end{bmatrix} \in R^{2m \times 2n}$ ,

그리고  $\Gamma_S \begin{bmatrix} \alpha_{1s} & \beta_{1s} \\ \alpha_{2s} & \beta_{2s} \end{bmatrix} \in R^{2m \times 2(n-m)}$ .

식(14)에서,  $\dot{q}_M \left( = \begin{bmatrix} {}^1\dot{q}_M \\ {}^2\dot{q}_M \end{bmatrix} \right)$ 을  $\dot{X}_{ex}$ 와  $\dot{q}_s$ 의 함수로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\dot{q}_M = \Gamma_M^{-1}(\dot{X}_{ex} - \Gamma_S \dot{q}_s) \quad (15)$$

이 행렬 분할 방법(Matrix Decomposition Method)를 가격함수(Cost Function)에 적용하면 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \|\dot{X}_B\| &= \|\omega_1 {}^1\dot{q} + \omega_2 {}^2\dot{q}\| \\ &= \left\| \Delta_M \begin{bmatrix} {}^1\dot{q}_M \\ {}^2\dot{q}_M \end{bmatrix} + \Delta_S \begin{bmatrix} {}^1\dot{q}_s \\ {}^2\dot{q}_s \end{bmatrix} \right\| \end{aligned} \quad (16)$$

위에서  $\Delta_M = [\omega_{1M} \ \omega_{2M}] \in R^{m \times 2m}$  그리고  $\Delta_S = [\omega_{1s} \ \omega_{2s}] \in R^{m \times 2(n-m)}$  식 (15)를 (16)에 대입하면,

$$\begin{aligned} Cost &= \left\| \Delta_M \Gamma_M^{-1} (X - \Gamma_S \dot{q}_s) + \Delta_S \dot{q}_s \right\| \\ &= \|A + B \dot{q}_s\|^2 \end{aligned} \quad (17)$$

위에서  $A = \Delta_M \Gamma_M^{-1} X \in R^{m \times 1}$ ,

그리고  $B = \Delta_S - \Delta_M \Gamma_M^{-1} \Gamma_S \in R^{m \times 2(n-m)}$

이 가격함수의 최소화 조건을 찾기위하여, 우리는 가격함수를  $\dot{q}_s$ 에 대해 편미분할 수 있다.

$$\begin{aligned} \partial Cost / \partial \dot{q}_s &= 2B^T (A + B \dot{q}_s) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

따라서, 최적  $\dot{q}_s$ 가 얻어지고 이 값은 우주선에 미치는 영향을 극소화 한다. 두개의 로봇트가 각기 n차의 자유도를 갖는 잉여로봇트를 사용할 때, 전체 잉여도  $(2(n-m))$ 가 작업공간의 차원(m)보다 작거나 같으면, 최적  $\dot{q}_s$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{q}_{s, optimum} = -(B^T B)^{-1} B^T A. \quad (19)$$

식(19)를 (15)에 대입하면,

$$\dot{q}_{M, optimum} = \Gamma_M^{-1} (\dot{X} - \Gamma_S \dot{q}_{s, optimum}). \quad (20)$$

### Ⅳ. 자체 조정계(Self-Tunable System)

폐쇄키네마틱 계에 충분한 잉여도가 있을때, 즉,  $2(n-m) \geq m$ , 기반 우주선은 조인트 움직임에 의해 특정한 형태로 제어되어질 수 있다. 이미 언급한 바와같이 로봇트 손의 위치/방향은 조인트 변수들의 함수일 뿐만 아니라 기반 우주선의 위치/방향의 함수이다. 따라서, 로봇트 손의 제어는 조인트 변수들의 변화내역(Time History)을 고려하지 않고는 이루어질 수 없다. 그러나, 만약  $2(n-m) \geq m$ 이면 기반 우주선은 조인트 움직임의 적절한 제어에 의해 정지 상태로 유지되어질 수 있다. 이는 우주선에 설치된 로봇트의 비균일 제약(Non-honoric Constraints)으로 부터 자유롭게 해 주며 로봇트 손의 위치/방향제어를 용이하게 해 준다.  $2(n-m) \geq m$ 일때, 두 작업점 제어 문제는 다음과 같이 간단히 표시된다.

$$\begin{bmatrix} {}^1X \\ {}^2X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1\dot{q} \\ {}^2\dot{q} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \|X_B\|^2 &= 0 \\ &= \dot{q}^T W^T W \dot{q} \end{aligned} \quad (22)$$

식(8),(9) 11)에서 보여진 바와 같이  $\|X_B\|=0$ 일때, 행렬들  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2$  및  $\beta_2$ 는 각각  ${}^1J(\triangleq \begin{bmatrix} 1 & J_L \\ & 1 & J_A \end{bmatrix})$ , 0,0, 및  ${}^2J(\triangleq \begin{bmatrix} 2 & J_L \\ & 2 & J_A \end{bmatrix})$  로 된다.

이는 기반 우주선의 움직임 ( $\|X_B\|$ )이 영으로 유지되어질 수 있는 한, 로봇의 움직임은 종래의 고정된 기반 로봇 동작에서와 같이 조인트 움직임에 의해 제어되어질 수 있음을 나타낸다. 이들 수식들은 재정리 되어 하나의 행렬식으로 나타내어진다.

$$X_{ex} = J_{ex} \dot{q} \quad (23)$$

위에서  $X_{ex} \triangleq \begin{bmatrix} 1 \dot{X} \\ 2 \dot{X} \\ 0 \end{bmatrix} \in R^{3m \times 1}$

그리고  $J_{ex} \triangleq \begin{bmatrix} 1J & 0 \\ 0 & 2J \\ \omega_1 & \omega_2 \end{bmatrix} \in R^{3m \times 2n}$

이렇게 정리하고 보니, 만약에  $3m < 2n$ 이면 이 폐 키네마틱 사슬계는 하나의 잉여 로봇으로 간주 되어질 수 있다.

<상대 속도에 의한 협동 제어>

두개의 로봇에 의한 조립 및 수선 동작은 그 두 로봇간의 상대속도,  $\dot{X}_d$ , 에 의하여 기술 되어질 수 있다. 따라서, 우리는 새로운 잉여도를  $\dot{X}_{1d}$ 와  $\dot{X}_{2d}$ 를 선택함에 있어서 가질 수 있다.

$$\dot{X}_d = \dot{X}_{1d} - \dot{X}_{2d} \quad (24)$$

식(21)을 식(24)에 대입하면, 조립 및 수선 동작은 다음과 같이 기술 되어질 수 있다.

$$[{}^1J \ -2J] \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = X_d \quad (25)$$

$$[\omega_1 \ \omega_2] \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (= X_B) \quad (26)$$

일반적으로 식(25)와(26)은 하나의 행렬식으로 결합 되어질 수 있다. 즉,

$$X_{ex} = J_{ex} \dot{q} \quad (27)$$

위에서  $X_{ex} \triangleq \begin{bmatrix} X_d \\ 0 \end{bmatrix} \in R^{2m \times 1}$

그리고  $J_{ex} \triangleq \begin{bmatrix} 1J & -2J \\ \omega_1 & \omega_2 \end{bmatrix} \in R^{2m \times 2n}$

따라서 이제는 만약  $2m \leq 2n$ 이면, 즉 각 로봇이 갖고 있는 조인트 수(n)가 작업공간의 차원(m)보다 크면, 우주선에 설치된 두개의 로봇에 의한 조립 및 수선동작을 하나의 잉여 로봇에 의한 동작으로 간주되어 제어되어질 수 있다.

### V. 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서는 다작용점 제어기술이 우주선/로봇 계의 제어에 어떻게 활용되어질 수 있는가를 보여주는 한 예를 선정하였다. 목적에 따라서 우주선/로봇계에 다른 작용점을 선정할 수 있음을 보여주었다. (4)

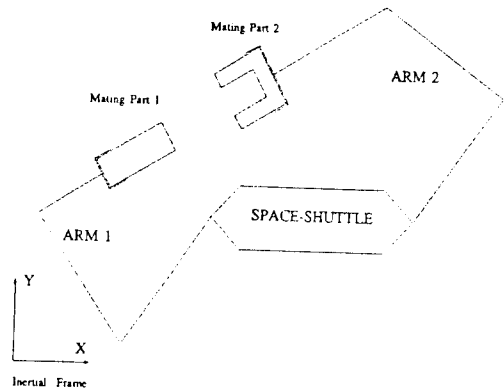


그림 2. 조립부품을 쥐고 있는 우주선/로봇의 초기 자세

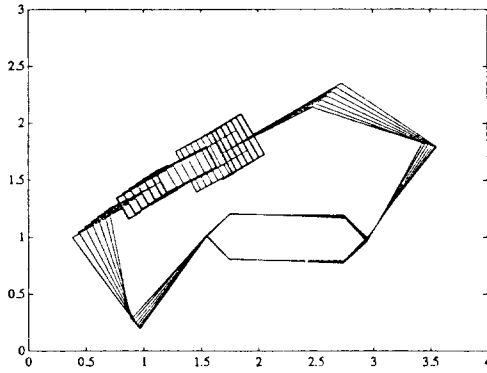
Fig 2. Initial Configuration of Space-shuttle/Robot System holding mating parts.

표 1. 각 로봇의 질량 및 길이 [Kg, m]

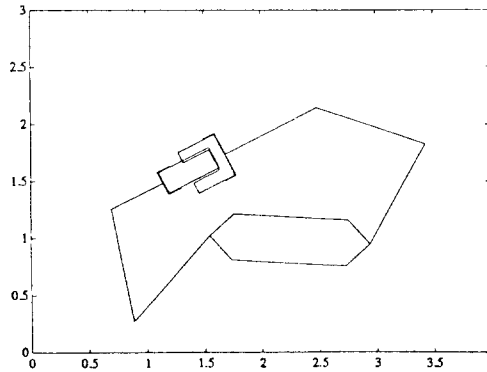
Table 1. Mass/Length of each Robot Links [Kg, m].

	ARM 1	ARM 2	Space-Shuttle
Link 1	10, 1.0	10, 1.0	100, 1.4
Link 2	10, 1.0	10, 1.0	
Link 3/Mating Part	20, 1.0	20, 1.0	

그림 2는 조립되어질 부품들을 쥐고 있는 우주선/로봇 계의 초기자세를 보여준다. 도표 1은 그 계의 크기 및 질량 구성을 보여준다. 계산상의 편의를 위해 각 링크의 모든 질량은 각 링크의 끝에 큐빅



(a)



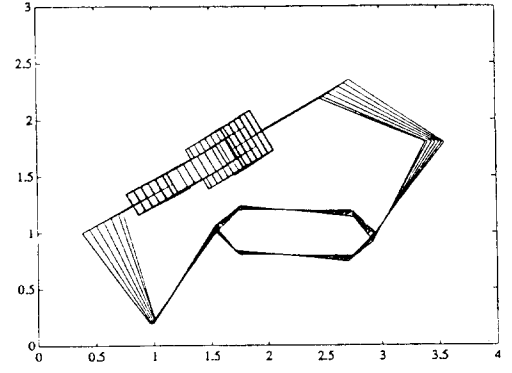
(b)

그림 3. 종래의 Jacobian을 사용한 조립동작  
(a) 동작 궤적  
(b) 최종 자세

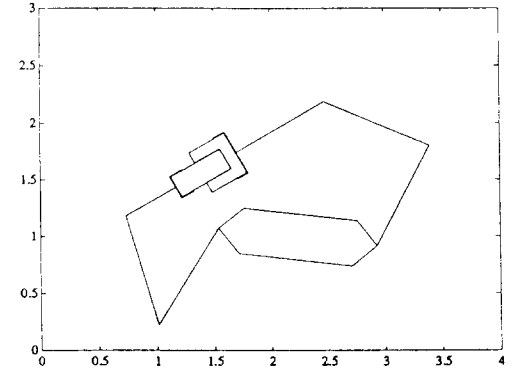
Fig 3. Assembly Operation Using Conventional Jacobian.  
(a) Operating Trace.  
(b) Final Configuration.

(Cubic)모양으로 존재하는 것으로 가정하며, 이에따라 이너시아행렬  $K_1$ 는 동일 행렬(Unity Matrix)로 된다. 그림 3에서는 로봇의 동작이 우주선에 미치는 영향을 고려하지 않은 종래의 Jacobian을 사용하여서는 조립동작이 정확하게 행해질 수 없음을 보여준다. 최종 자세 (그림3(b))에서는 조립동작 동안에 발생한 오차의 양을 보여주고 있다.

그림 4에서는 확장된 Jacobian(식(11)참조)을 사용함으로써 하여 조립동작이 정확하게 행해질 수 있음을 보여준다. 그러나, 기반 우주선의 위치/고도가 초



(a)

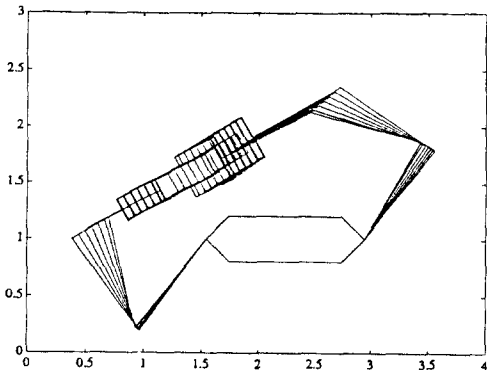


(b)

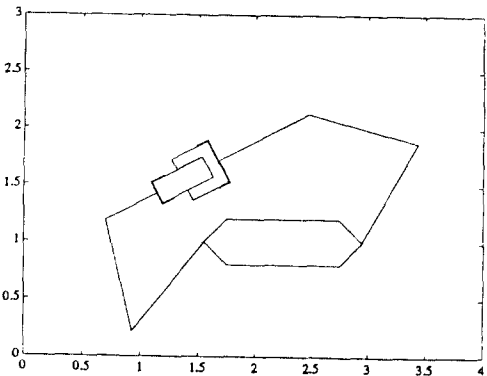
그림 4. 확장된 Jacobian을 사용한 조립동작  
(a) 동작 궤적  
(b) 최종 자세

Fig 4. Assembly Operation Using Extended Jacobian  
(a) Operating Trace.  
(b) Final Configuration.

기상태로 유지되어지지 않았음을 유의하여야 한다. 그림 5에서는 두개의 로봇 손 사이의 상대속도 및 기반우주선의 속도를 제어함으로써 하여 (식(27)참조) 우주선의 위치/고도에 아무런 영향을 주지않고도 조립동작이 성공적으로 행해질 수 있음을 보여준다. 우주선의 위치/고도의 변화는 통신장치들로 하여금 그들의 신호를 제대로 송수신할 수 없게끔 할 수 있다. 그러므로, 이러한 상수들(우주선의 위치/고도)을 일정하게 유지하는 것은 우주선제어에 있어서 매우 중요한 일이다.



(a)



(b)

그림 5. 우주선 제어와 함께 행해진 조립동작  
(a) 동작 궤적  
(b) 최종 자세

Fig. 5. Assembly Operation with Concurrent Control.  
(a) Operating Trace.  
(b) Final Configuration.

## VI. 결론

본 논문에서는 우주선에 설치된 로봇의 제어특성 및 방법에 대하여 논의 하였다. 우주선에 설치된 로봇에 의한 물체의 운반작업을 위하여서는 로봇손의 제어뿐만 아니라 우주선의 제어가 필요하다. 우주선/로봇계의 잉여도를 활용하여 이러한 반작용 영향을 극소화 하는 방법을 연구하였다. 즉, 잉여도가 충분할 때는 잉여도를 활용하여 우주선을 유사 정지상태(Virtually Stationary)로 만들어, 로봇제

어를 간편하도록 하고 그 제어의 정확도를 증대시킬 수 있다. 또한, 우리는 계의 잉여도가 작업의 요구조건에 따라 달라질 수 있음을 보였다. 일례로, 두 로봇에 의한 조립 및 수선동작은 두 로봇 손간의 상대속도에 의해 기술되어질 수 있다. 이로 인하여, 전체계의 잉여도는 작업공간의 차수만큼 증가되어질 수 있다. 본 우주선에 설치된 로봇의 제어에 관한 연구는 급속히 발달되는 계산능력(Computing Power)과 더불어 우주선 공간에서의 조립 및 수선작업을 위해 그 활용성을 제시한다.

## 參考文獻

- [ 1 ] S.Lee, G.Bekey, and A.K.Bejczy, "Computer Control of Space-Borne Teleoperators with Sensory Feedback, " *IEEE Int. conf. on Robotics and Automation*, pp.205-214, March, 1985.
- [ 2 ] D.R.Yoerger and J.Slotine, "Supervisory Architecture for Underwater Teleoperation," *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, North Carolina, pp. 2068-2073, 1987.
- [ 3 ] L.Conway, R.Volz, and M. Walker, "Tele-Autonomous System: Methods and Architectures for Intermingling Autonomous and Telerobotic Technology," *Proc. IEEE Int.Cofc. on Robotics and Automation*, Raleigh, North Carolina, 1987.
- [ 4 ] Sukhan Lee and Jang M.Lee, "Multiple Task Point Control of a Redundant Manipulator," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, May, 1990.
- [ 5 ] T.Schilling, " Increasing the Efficiency of Telemanipulators through the Robotic Exchange of End Tooling," *Int. Jour. of Robotics and Automation*, vol. 5, no.1, pp.16-19, 1990.
- [ 6 ] Z.Vafa and S.Dubowsky, "On the Dynamics of Manipulators in Space using the Virtual Manipulator Approach," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Raleigh, North Carolina, pp.579-585, 1987.
- [ 7 ] E.Papadopoulos and S.Dubowsky, "On

- the Nature of Control Algorithms for Space Manipulators." *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Cincinnati, Ohio, pp.1102-1108, 1990.
- [8] Y. Masutani, F. Miyazaki and S. Arimoto, "Sensory Feedback Control for Space Manipulators." *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Scottsdale, Arizona, pp. 1346-1351, 1989.
- [9] Y. Umetani and K. Yoshida, "Resolved Motion Rate Control of Space Manipulators with Generalized Jacobian Matrix." *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 3, pp. 303-314, June 1989.
- [10] Richard W. Longman, Robert E. Lindberg, and Michael F. Zedd, "Satellite-Mounted Robot Manipulators- New Kinematics and Reaction Moment Compensation." *Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 6, no. 3, pp. 87-103, Fall 1987.
- [11] Sukhan Lee and Jang M. Lee, "Dynamic Model and Cooperative Control of a Serially Linked Manipulator System." *Proc. 29th IEEE Int. Conf. on Decision and Control*, Honolulu, Hawaii, Dec. 1990.
- [12] Sukhan Lee and Jang M. Lee, "Dual Redundant Arm Configuration Optimization with Task-Oriented Dual Arm Manipulability." *Proc. 27th IEEE Conf. on Decision and Control*, Austin, TX, Dec. 1988.
- [13] S. Salcudean and Chae An, "On the Control of Redundant Coarse-Fine Manipulators." *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automations*, Scottsdale, Arizona, pp. 1834-1840, 1989.
- [14] A. A. Maciejewski and C. A. Klein, "Obstacle Avoidance for Kinematically Redundant Manipulator in Dynamically Varying Environments," *The Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 4, no. 3, pp. 109-117, Fall 1985.
- [15] D. Yoerger and J. Slotine, "Task Resolved Motion Control of Vehicle-Manipulator System," *Int. Jour. of Robotics Automation*, vol. 2, no. 3, pp. 144-150, 1987.

---

 著者紹介
 

---



李章明(正會員)

1957年 11月 22日生. 1980年 2月 서울대학교 전자공학과(공학사). 1982年 2月 서울대학교 전자공학과 대학원(공학석사). 1990年 12月 USC (남가주대학교) 박사학위 취득 (Computer Engineering 전공). 1993年 6月 현재 부산대학교 공과대학 전자공학과 조교수. 주관심분야는 다관절 로봇 시스템의 설계 및 제어.  $\mu$ -processor 응용 시스템 설계. Motor 구동방식 및 제어 등임.